

合成孔径雷达的空间傅里叶分解成像¹

王军锋 毛引芳 陈宗鹭

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 空间傅里叶分解法是一种新的合成孔径雷达(SAR)成像方法。这种方法考虑到了波前的球面特性,所以即使在近场条件下,也不会像传统方法那样由于采用了平面波近似而使图象畸变。本文提出了一种空间傅里叶分解法的实现算法。对计算机模拟数据的成像结果证明了这种算法的有效性。

关键词 合成孔径雷达成像, 平面波近似, 空间傅里叶分解法

中图分类号 TN958

1 引言

合成孔径雷达(SAR)成像的传统方法有距离多普勒法、叠加子孔径的距离多普勒法、拼装子区域的距离多普勒法、极坐标格式法和滤波逆投影法^[1]。这些方法都是基于平面波近似的。所谓平面波近似,是指在远场条件下,即当合成孔径和目标尺寸远远小于雷达与目标间的距离时,可以将实为球面的波前看成是平面。但是在近场条件下,平面波近似将会有较大的误差,从而使图象畸变。

空间傅里叶分解法克服了这一缺陷。它通过回波信号关于雷达位置坐标的空间傅里叶变换,得到图象空间频域上的一组非均匀采样值,进而由这些非均匀采样值重建图象。这种方法是将球面波分解为平面波的线性组合,而不是简单地用平面波来近似,因而即使在近场条件下,也不会象传统方法那样产生图象畸变。

最早提出上述思想的是纽约州立大学的苏梅克^[2,3]。我们在深入研究其工作的基础上,提出了一种空间傅里叶分解法的实现算法。对计算机模拟数据的成像结果证明了这种算法的有效性。

2 数学模型

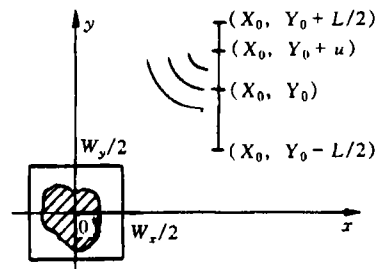


图 1 SAR 成像的物理模型

¹ 1996-07-24 收到, 1997-09-17 定稿

SAR 成像的物理模型如图 1 所示。目标位于四条直线 $x = |W_x/2|$ 和 $y = |W_y/2|$ 所围成的矩形区域内。其反射特性函数为 $f(x, y)$, 即有待重建的图象。载机沿直线 $x = X_0$ 匀速运动。这里我们假定航线位于成像区域右侧。设航迹的中点为 (X_0, Y_0) , 长度为 L , 则上面任意一点的坐标可以表示为 $(X_0, Y_0 + u)$, 其中 $u \in [-L/2, L/2]$ 。雷达信号包含多个频率, f 为其中的任意一个。光速用 c 来表示。

雷达在点 $(X_0, Y_0 + u)$ 所发射的频率为 f 的脉冲信号经反射、接收、同相正交解调、采样和 A/D 转换之后, 可以得到用如下式子表示的回波信号:

$$s(u, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp \left[j \frac{4\pi f}{c} \sqrt{(X_0 - x)^2 + (Y_0 + u - y)^2} \right] dx dy.$$

它关于 u 的空间傅里叶变换 $S(f_u, f)$ 和图象的空间频谱 $F(f_x, f_y)$ 之间存在着下列关系:

$$F\left(\sqrt{\frac{4f^2}{c^2} - f_u^2}, f_u\right) = S(f_u, f) \sqrt{\frac{4f^2}{c^2} - f_u^2} \times \exp \left[-j2\pi \left(\sqrt{\frac{4f^2}{c^2} - f_u^2} X_0 + f_u Y_0 \right) \right].$$

此即空间傅里叶分解法的数学模型^[2]。基于这一模型重建图象时, 距离向和方位向的分辨率分别为^[2]

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 1/L = c/(2\Delta f), \\ \sigma_a &= 1/W = c\sqrt{X_0^2 + Y_0^2} / [2f_0(L + W_y) \cos \theta_0]. \end{aligned}$$

3 算法

基于空间傅里叶分解法的数学模型可提出如下算法:

3.1 空间傅里叶分解 由 $s(u, f)$ 求 $S(f_u, f)$ 。这一步骤又可分为下面三个子步骤:

(1) 相位前校正 将回波信号序列乘以因子 $\exp\{jm\pi[1 - (4f\Delta u \sin \theta_0)/c]\}$, $m = 0, 1, \dots, M-1$ 。其中 Δ_u 为孔径采样间隔, θ_0 为由原点指向孔径中心的向量相对于 x 轴正方向的转角, M 为脉冲个数。回波信号是带通信号, 其空间频带如下式所示^[2]:

$$|f_u - (2f \sin \theta_0)/c| \leq \{[f(L + W_y) \cos^2 \theta_0] / (c\sqrt{X_0^2 + Y_0^2})\}.$$

由于快速傅里叶变换是对主值频谱的采样, 因而在对回波信号作快速傅里叶变换之前必须进行相位校正, 以使通带内的频谱移至主值区。

(2) 快速傅里叶变换 对相位前校正之后的序列做快速傅里叶变换。

(3) 相位后校正 将快速傅里叶变换之后的序列乘以因子 $\exp(jf_u L)$ 。其中

$$f_u = (2f \sin \theta_0)/c + m/(M\Delta_u).$$

这里 $m = -M/2, -M/2 + 1, \dots, M/2 - 1$ 。

由于回波信号不是主值信号, 它的相位前校正和快速傅里叶变换实质上是在平移至主值区之后进行的, 因而在快速傅里叶变换之后还要进行相位校正, 以便消去由于空间域的平移而在空间频域引入的相位因子。

3.2 幅度和相位校正 将 $S(f_u, f)$ 乘以 $\sqrt{\frac{4f^2}{c^2} - f_u^2} \exp[-j2\pi(\sqrt{\frac{4f^2}{c^2} - f_u^2} X_0 + f_u Y_0)$, 其中 $f_u = (2f \sin \theta_0)/c + m/(M\Delta_u)$, $m = -M/2, -M/2 + 1, \dots, M/2 + 1$. 本步骤可与步骤 3.1 的子步骤 (3) 合并为一个步骤。

3.3 对其它频率的脉冲信号重复步骤 3.1 和 3.2 假如雷达在 M 个位置上发射了信号, 每个信号里面包含了 N 个频率, 那么我们就可以得到 $F(f_x, f_y)$ 在 $f_x - f_y$ 域上的 $M \times N$ 个采样值。这些采样值的分布是非均匀的。

3.4 由空间频域上的非均匀采样值重建图象 其方法可参考文献 [4]。

4 成像结果

我们利用计算机模拟的方法得到了两组回波数据。第一组数据是在远场条件下得到的。成像目标是四条直线 $|x|=50\text{m}$ 和 $|y|=50\text{m}$ 所围成的正方形区。一架飞机由五条线段组成。决定其骨架的七个点的坐标为 (单位: m): $A(0,30), B(0,10), C(0,-30), D(-25,-2), E(25,-2), F(-7,-36), G(7,-36)$ 。飞机上任一点的散射强度均设为 1。雷达沿直线 $x=1000\text{m}$ 匀速运动, 每前进 1m 发射一次脉冲串信号, 共 256 次, 运动轨迹中心 (即发射第 129 个脉冲信号时的位置) 的坐标为 $(1000\text{m}, 0)$ 。在每一个位置上, 雷达所发射的信号为步进频率信号 [5], 频率的步进值为 $5 \times 10^5\text{Hz}$, 共 128 个频率, 中心频率 (即第 65 个频率) 为 $3 \times 10^8\text{Hz}$ 。第二组数据则是在近场条件下得到的。在上述模型中, 改取航迹中点的坐标为 $(250\text{m}, 0)$, 孔径采样间隔为 0.5m , 频率的步进值为 10^6Hz , 共 64 个频率, 即得第二组数据。

图 2-5 分别给出了利用空间傅里叶分解法和传统方法对这两组数据处理的结果。传统方法这里采用的是极坐标格式法。从图中可以看到, 在远场条件下, 空间傅里叶分解法和传统方法几乎没有区别。但在近场条件下, 传统方法由于采用了平面波近似致使图象畸变, 而空间傅里叶分解法则仍能得到很好的图象。



图 2 远场条件下的空间傅里叶分解法成像



图 3 远场条件下的传统方法成像



图 4 近场条件下的空间傅里叶分解法成像

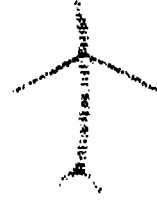


图 5 近场条件下的传统方法成像

5 结 论

空间傅里叶分解法考虑到了波前的球面特性, 所以即使在近场条件下, 也不会象传统方法那样由于采用了平面波近似而致使图象畸变。对计算机模拟数据的成像结果证明了这一结论, 也证明了本文所提出的算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Ausherman D A, *et al.* Development in radar imaging. *IEEE Trans. on AES*, 1984, 20(4): 363-398.
- [2] Soumekh M. A system model and inversion for synthetic aperture radar imaging. *IEEE Trans. on IP*, 1992, 1(1): 64-76.
- [3] Soumekh M. Band-limited interpolation from unevenly spaced sampled data. *IEEE Trans. on ASSP*, 1988, 36(1): 110-122.
- [4] 王军锋, 毛引芳. 由空间频域上的非均匀采样数据重建图象的方法研究. *电子科学学刊*, 1997, 19(4): 459-463.
- [5] Wehner D R, *et al.* Stepped frequency radar target imaging. US Patent, 1984, 4450444.

SPATIAL FOURIER DECOMPOSITION METHOD FOR SAR IMAGING

Wang Junfeng Mao Yinfang Chen Zongzhi

(*Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

Abstract The spatial Fourier decomposition method is a new method for the SAR imaging. It incorporates the spherical nature of the radar's radiation pattern and so the image would not distort even at near field. This paper presents an algorithm for the spatial Fourier decomposition method. The imaging results of simulated targets prove it is effective.

Key words SAR imaging, Plane wave approximation, Spatial fourier decomposition method

王军锋: 男, 1971 年生, 硕士, 现从事雷达系统和信号处理等方面的研究工作。

毛引芳: 男, 1938 年生, 副研究员, 现从事微波成像、雷达系统和信号处理等方面的研究工作。

陈宗鸷: 男, 1922 年生, 研究员, 博士生导师, 现主要从事微波成像、雷达、信号处理、信息论和人工神经网络的研究。